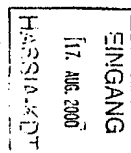




DEUTSCHES
PATENTAMT

① Aktenzeichen: 196 36 429.9-34
② Anmeldetag: 7. 9. 96
③ Offenlegungstag: —
④ Veröffentlichungstag: 20. 11. 97
der Patenterteilung:



DE 196 36 429 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑩ Patentinhaber:
JENOPTIK AG, 07743 Jena, DE

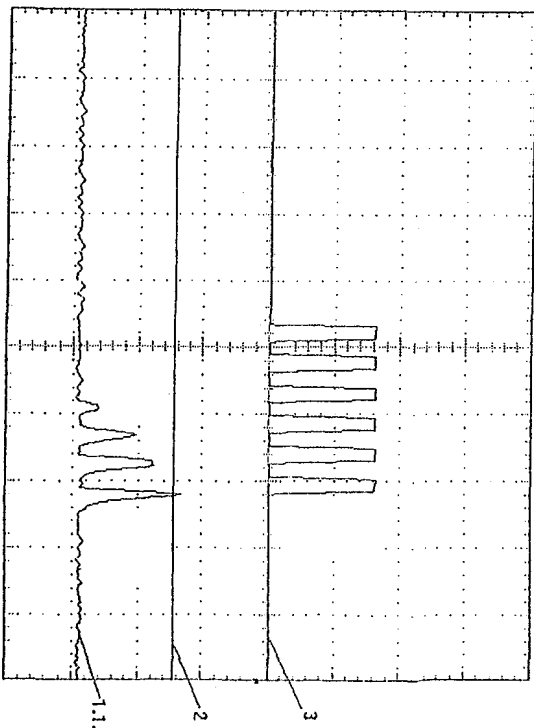
⑪ Erfinder:
Lutze, Walter, 07747 Jena, DE; Schmieder, Frank,
07616 Bürgel, DE; Schwarze, Ralf, 21337 Lüneburg,
DE; Schütze, Rainer, 07745 Jena, DE; Schuster,
Ulrich, 07747 Jena, DE; Schmidt, Wolfgang, 58464
Soest, DE

⑫ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

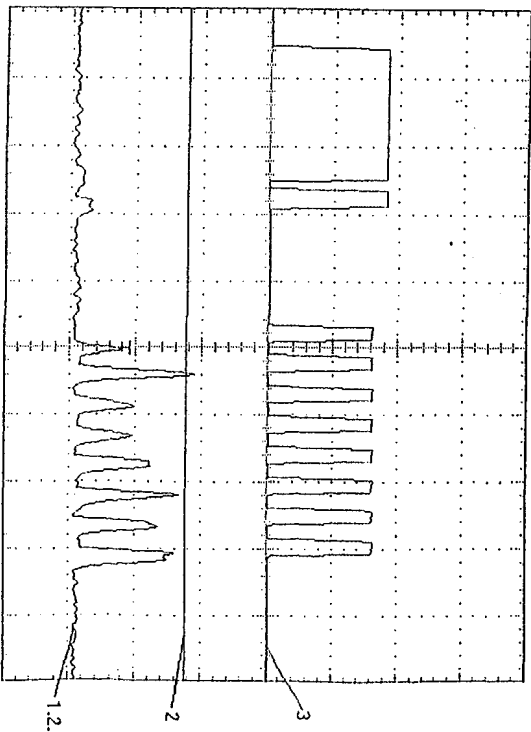
DE 39 43 523 C2
DE 43 20 341 A1
US 51 01 080
US 45 49 063
EP 02 34 805 B1

⑬ Verfahren zur Herstellung einer Schwächelinie mittels Laser

⑭ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Schwächelinie in ein Flachmaterial durch einseitig brüchiges Abtragen des Flachmaterials mittels steuerbare gepulster Laserstrahlung. Die entstehende Schwächelinie ist auf der unbearbeiteten Oberfläche des Flachmaterials nicht sichtbar und weist eine reproduzierbare konstante Bruchfestigkeit auf.



Figur 1



Figur 2

weisen, je geringer die Restwandstärke, desto geringer ist die Bruchfestigkeit des Flachmaterials, vorausgesetzt, die Materialkonstanten der Schichten und die Stegprofile sind unverändert. Geringe Restwandstärken und schmale Stegprofile führen jedoch zu einer starken thermischen Belastung, die ebenso wie Materialerschütterungen infolge von Alterung dazu führen kann, daß sich das Restmaterial in die Sacklöcher einlegt und so die Schwächelinie auch von der unbearbeiteten Flachmaterialseite her sichtbar wird. Dies tritt besonders dann auf, wenn einzelne Materialschichten, insbesondere die unmittelbar der Oberflächenschicht benachbarten Schichten so weich sind, daß die verbleibenden Stege ihrer Stützfunktion nicht mehr gerecht werden können. Um dieses zu vermeiden, erfolgt ein Abtrag im periodischen Wechsel auf verschiedene Tiefen, wodurch im weichen Material eine deutlich größere Stegbreite erhalten bleibt und die Oberflächenschicht thermisch geringer belastet wird. Die Reißfestigkeit der Schwächelinie wird dadurch unbedeutend erhöht, die Gefahr der entstehenden Sichtbarkeit der Schwächelinie jedoch vermindert.

Besonders vorteilhaft ist das erfindungsgemäße Verfahren, wenn die Schwächelinie in ein Verbundmaterial eingebracht wird, deren Oberflächenschicht räumlich strukturiert ist. Die Reißfestigkeit der Schwächelinie ist homogen trotz Schwankung der Materialstärke der Oberflächenschicht durch deren Strukturierung, da erfindungsgemäß auf eine definierte Restwandstärke abgetragen wurde. Vorteilhaft gegenüber einem Flachmaterial mit ebener, unstrukturierter Oberfläche ist, daß Einschnügelungen des Restmaterials in die Sacklöcher schlechter durch das menschliche Auge wahrgenommen werden. Noch schlechter wahrnehmbar sind Einschnügelungen oder auch Durchbrüche, wenn die Schwächelinie nicht kontinuierlich verläuft. Schwächelinien, die mit bloßem Auge nicht erkennbar sein sollen, sind in der Regel nicht dazu vorgesehen, daß sie mit gezielter Kräfteinwirkung in Längsrichtung gebrochen werden, sondern durch eine flächige einwirkende Kraft bricht das Flachmaterial entlang der Schwächelinien und schließt dadurch eine Öffnung im Flachmaterial. Üblich ist es, die Schwächelinie gleich der Umfangslinie der gewünschten Öffnung zu erzeugen. Um jedoch die Wahrscheinlichkeit des Sichtbarwerdens zu verringern, ist eine um diese Umfangslinie alternierender Schwächelinienverlauf von Vorteil. Dabei kann die Schwächelinie stochastisch um die Umfangslinie alternierend oder auch bei ähnlicher Oberflächenstruktur einer bestimmten Funktion folgend. Mit einer entsprechend groben Oberflächenstruktur und einem an diese angepaßten Schwächelinienverlauf können sogar die Sacklöcher der Schwächelinie mit einer Restwandstärke Null erzeugt werden, ohne daß dies mit bloßem Auge wahrgenommen werden können, sofern die Durchbrüche nur klein genug sind, was mittels Laser gut erreichbar ist.

Die räumliche Flachmaterialien vorteilhaft bearbeitet werden. Anstelle der Schaumstoffschicht und der Holzformschicht des ersten Ausführungsbeispiels kann die Oberflächenschicht auf verschiedene ein- oder mehrschichtige Flachmaterialien aufgebracht sein, wie beispielsweise Kunststoffverbundmaterialien und laminierte sowie Holz, Gummi, Kautschuk und Karton. In einem ersten Ausführungsbeispiel ist das Flachmaterial ein Verbundmaterial, bestehend aus drei verschiedenen inhomogenen Materialschichten, einer festen, dem Verbundmaterial seine Stabilität gebenden Trägerschicht aus Holzformstoff, einer weichen Schaumstoffschicht und einer dünnen TPO-Folie als Oberflächenschicht. Zur Erreichung der gewünschten Bruchfestigkeit wurde eine Schwächelinienstruktur ausgewählt mit abwechselnder Folge von je zwei Sacklöchern der Restwandstärke a und je zwei Sacklöchern der Restwandstärke b bei konstanter Stegbreite c. Die Restwandstärke a, kleiner der Dicke der TPO-Folie wurde in Abhängigkeit der Materialparameter der TPO-Folie so festgelegt, daß die Folie teilweise abgetragen wird, jedoch das Restmaterial ausreichend stark ist, um auch über lange Zeit formstabil zu bleiben. Die Restwandstärke b größer der Dicke der TPO-Folie wurde so festgelegt, daß die Trägerschicht vollständig durchdrungen wird, während in der Schaumstoffschicht höchstens ein geringer Abtrag erfolgt. Dadurch bleibt der Schaum über größere Stege breiten zur Stützung der Folie erhalten, während die Trägerschicht kontinuierlich geschwächt wird. Die Schaumstoffschicht und die TPO-Folie weisen einen Transmissionsgrad für die Wellenlänge des BearbeitungsLasers von deutlich größer Null auf.

Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein in der Pulsleistung und Pulsfolge steuerbarer Laserstrahl auf das Verbundmaterial seitens der Trägerschicht gerichtet. Unterhalb des Verbundmaterials, seitens der TPO-Folie, ist in Richtung des Laserstrahls ausgerichtet ein Sensor angeordnet, welcher den durch das Verbundmaterial transmittierten Anteil des Laserstrahls detektiert. Die Parameter des Detektors und der Laserstrahlungsquelle sind so aufeinander abgestimmt, daß ein erstes Signal dann detektiert wird, wenn die Trägerschicht auf Bearbeitungsart vollständig abgetragen ist. Zwischen dem Laserstrahl und dem Verbundmaterial erfolgt eine Relativbewegung in Richtung der zu erzeugenden Schwächelinie. Diese Relativbewegung kann entweder eine kontinuierliche Bewegung sein mit einer Geschwindigkeit vernachlässigbar gering zur Pulsfrequenz, kleiner der maximalen Abtragsgeschwindigkeit oder die Bewegung wird stets während der Beaufschlagung des Verbundmaterials mit der Laserstrahlung unterbrochen.

Die Bearbeitung des Verbundmaterials beginnt mit einem Pulstest für hohe Pulsleistungen, was ein schnelles Durchdringen der Trägerschicht ermöglicht. Mit der Detektion eines ersten Signals wird das Pulstestsignal verändert, um es dem Abtragsverhalten der Schaumstoffschicht anzupassen. Insbesondere wird die Pulsdauer kleiner gewählt, was eine geringe thermische Belastung zur Folge und Verlangsamung des Abtrages zur Folge hat. Je langsamer der Abtrag erfolgt, desto mehr Signale werden detektiert. Nach jedem Signalempfang wird über die bereits detektierten Signale ein Integral gebildet und der Integralwert mit einem Komparatormwert verglichen. Sobald der Integralwert den Komparatormwert erreicht, welcher in vorstehenden Versuchsbeispielen als Korrelationswert zur Restwandstärke ermittelt wurde, wird die Laserstrahlung abgeschaltet. Analog wird das zweite Loch im Siegbestand c zum ersten Loch erzeugt. Bei der Erzeugung des dritten und vierten Loches wird die Laserstrahlung bereits dann abgeschaltet, wenn der gebildete Integralwert den Komparatormwert b erreicht. Da dessen Integralwert bereits nach Detektieren eines Signals oder nur weniger Signale erreicht wird, ist die Genauigkeit der verbleibenden Restwandstärke auch geringer. Dies ist jedoch nicht von Nachteil, da ein geringfügiges Eindringen in den Schaumstoff mit unterschiedlicher Tiefe keinen Einfluß auf die Bruchfestigkeit der Schwächelinie insgesamt hat.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erzeugung einer Schwächelinie in ein Flachmaterial durch einseitiges örtliches Abtragen des Flachmaterials in Form von Sacklöchern, die ineinander aneinandergelehnt angeordnet und untereinander jeweils durch einen Steg getrennt sind, mittels steuerbarer gepulster Laserstrahlung, wobei eine Relativbewegung zwischen der Laserstrahlung und dem Flachmaterial in Richtung der zu erzeugenden Schwächelinie erfolgt, gekennzeichnet durch folgende Schritte:
 - Detektion einer durch den Boden des jeweiligen Sackloches transmittierenden Laserstrahlung nach jedem Laserpuls
 - Integralwertbildung über die bei der Erzeugung eines Sackloches erhaltenen Detektorsignale nach jeder Detektion,
 - Vergleich des Integralwertes mit einem für das jeweilige Sackloch vorgegebenen und mit der gewünschten Restwandstärke korrelierenden Sollwertes,
 - Abschalten der Laserstrahlung bei Erreichen des Sollwertes
 - Anschalten der Laserstrahlung nach erfolgter Relativbewegung über eine vorgegebene Strecke, welche für die gewünschte Stegbreite zwischen zwei benachbarten Sacklöchern bestimmend ist und Wiederholung der Verfahrensschritte, bis die Schwächelinie in vollständiger Länge erzeugt ist.
2. Verfahren zur Erzeugung einer Schwächelinie nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die detektierte Laserstrahlung ein Teil der Strahlung ist, welche den Abtrag bewirkt.
3. Verfahren zur Erzeugung einer Schwächelinie nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die detektierte Laserstrahlung ein Teil einer zusätzlich auf das gerade bearbeitete Sackloch gerichteten Meßstrahlung ist.
4. Verfahren zur Erzeugung einer Schwächelinie nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die für die einzelnen Sacklöcher vorgegebenen Sollwerte eine wiederkehrende Folge unterschiedlicher Beträge bilden, wodurch in verschiedenen Materialteilen verschiedene Stegbreiten herstellbar sind.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

die Materialdicke nicht konstant ist.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Schwächelinie in einem Flachmaterial durch einseitiges Abtragen des Flachmaterials mittels steuerbarer gepulster Laserstrahlung. Das Flachmaterial kann eben oder auch räumlich geformt sein.

Es ist für viele Verwendungszwecke üblich, Materialschwächung in Linienform vorzunehmen, um eine Sollbruchlinie zu schaffen, die im Bedarfsfall durch Kräfteinwirkung gebrochen wird, um die anliegenden Materialteile voneinander zu trennen oder eine Öffnung zu bilden. Es ist stets von Vorteil, wenn diese Sollbruchlinie über ihre Länge eine konstante Bruchfestigkeit aufweist, damit eine Trennung mit konstanter Kraft erfolgen kann. Für verschiedene Anwendungen ist es aus sicherheitstechnischen Gründen sogar erforderlich, daß der Bruchfestigkeit konstant und reproduzierbar herstellbar ist. Eine solche Anwendung ist beispielsweise eine Abtrag-Abdeckung. Aus ästhetischen Gründen besteht hier teilweise noch die Forderung, daß die Sollbruchlinie für den Fahrzeugmassen mit bloßem Auge nicht sichtbar sein soll.

Wollte man die Vorteile der Lasermaterialbearbeitung zur Herstellung solcher Schwächelinien nutzen, stellt sich die Erfüllung der Forderungen nach einer reproduzierbaren, konstanten Bruchfestigkeit als schwierig dar. Eine reproduzierbare, konstante Bruchfestigkeit erfordert im wesentlichen eine konstante und reproduzierbar herstellbare Restwandstärke im Bereich der tiefen Abtragung, die sich über einen gleichmäßig konstanten Bereich erstreckt, wenn das Material eine Dicke selbst bei homogenen Materialien konstanter Dicke hat sich eine definierte Restwandstärke mit einem ungestörten Bearbeitungslaser kaum erreichen. Schwankungen in der Strahlungsqualität und Strahlleistung führen zu entsprechenden Schwankungen in der Bearbeitungstiefe. Eine Steuerung des Lasers in Abhängigkeit von der Abtragstiefe wird erforderlich, was die Erfindung der Abtragstiefe voraussetzt.

Die Verwendung von mechanischem Meßmittel und somit eine betrübende Erfassung der Abtragstiefe scheitert schon aufgrund der geringen Schnitttieftoleranzen aus.

Ebenso können elektrische oder magnetische Meßverfahren nicht angewandt werden bei der Bearbeitung elektrisch nichtleitender Materialien.

Der Einfluß einer nicht konstanten Materialstärke auf die Bruchfestigkeit der Sollbruchlinie läßt sich nur durch einen in Abhängigkeit von der erfassten Restwandstärke geregelten Abtrag ausschließen. Hier scheint sich eine Lösung gemäß DE 43 20 341 A1 anzubieten. Es wird ein Verfahren zum Abtragen von Deckschichten von Glasbauteilen mit Laserstrahlung offenbart, bei welchem der Abtragvorgang in Abhängigkeit von Transmissionswerten geregelt wird.

Hier besteht die Aufgabe darin, die Deckschicht eines Glasbauteils dahingehend gezielt und definiert abzutragen, daß eine Restdeckschicht mit vorgegebener Schichtdickenverteilung auf dem Glasbauteil zurückbleibt. Über die Messung des Transmissionsgrades an der Bearbeitungsstelle läßt sich auf die noch vorhandene Schichtdicke auf dem Glasbauteil schließen. Damit ist dieses Meßverfahren insbesondere geeignet für den Abtrag ungleichmäßig Schichtdicken bis auf eine vorgegebene Restschichtdicke, ohne daß zuvor die Topologie der ungleichmäßigen Deckschicht ermittelt werden muß.

Zur Bestimmung der Restschichtdicke wird an der Bearbeitungsstelle die Intensität einer transmittierten Meßstrahlung nach jedem Bearbeitungsschritt gemessen und der Meßwert an einen Prozenträger weitergegeben. Durch Verknüpfung einzelner Meßwerte können verschiedene Bewertungskriterien, wie die Abtragseffizienz und relative Transmissionsänderung, bestimmt werden. Der Meßwert als Einzelwert wird mit einem Schwellwert verglichen und dient bei dessen Überschreitung als Abschaltkriterium zur Beendigung des Abtragvorgangs.

Analog erfolgt die Steuerung der Laserstrahlung im US-Patent 5,101,090. Hier werden ein Verfahren und eine Anordnung zur kontrollierten Entfernung eines Teiles der Ummantlung einer optischen Faser beschrieben, um an dieser Stelle Strahlung einleiten zu können. Der Materialabtrag erfolgt mittels Laserstrahlung, deren Einwirkungsdauer über die Erfassung der Bearbeitungsstelle transmittierten Laserstrahlung gesteuert wird. Die Laserstrahlung wird dann abgeschaltet, wenn die transmittierte Laserstrahlung ihr Maximum erreicht, so daß die Ummantlung an der Bearbeitungsstelle vollständig abgetragen ist, jedoch eine Beschädigung der optischen Faser vermeiden wird.

Wie praktische Versuche gezeigt haben, lassen sich Lösungen gemäß DE 43 20 341 und US 5,101,090 nicht mit Erfolg zur Erzeugung einer Schwächelinie in gewünschter Qualität anwenden.

Im Gegensatz zum beschriebenen Abtragen von Deckschichten auf Glasbauteilen gemäß DE 43 20 341, wo der Abtrag flächig erfolgt und somit sich entstehende Verbrennungsrisse und Verdampfungsgase sofort flächig verteilen und verflüchtigen, bleiben diese entstehenden Gase und Rückstände bei einem linienförmigen Abtrag, insbesondere wenn die Abtragstiefe wesentlich kleiner als die Abtragstiefe ist, an Abtragort länger konzentriert und verflüchtigen durch ihre Absorption die Transmissionswerte.

Zum besseren Verständnis sind in Fig. 1 und Fig. 2 zwei Meßwertdiagramme dargestellt. Der in Fig. 1 aufgetragene Detektorsignalverlauf 1.1 entspricht in etwa dem theoretischen Signalverlauf und entsteht z.B. bei dem Abtragsvorgang an einem homogenen Material, bei welchem die Abtragsrate sehr groß ist im Verhältnis zur Abtragstiefe und die Abtragsgeschwindigkeit gering ist. Nach Überschreitung des Rauschpegels steigt

der Pegel des Detektorsignals 1.1 kontinuierlich an.

Im Gegensatz hierzu ist der Anstieg des Detektorsignalsverlaufs 1.2, wie er bei einem linienförmigen Abtrag von inhomogenem Material entsteht, unsteil, d.h. der Anstieg ist im wesentlichen diskontinuierlich, erfaßte Nachfolgepunkte haben sogar teilweise einen niedrigeren Pegel als ihr Vorgänger. Daß der Anstieg des Detektorsignalsverlaufs 1.2 nicht kontinuierlich ist, läßt sich u.a. mit den inhomogenen Materialeigenschaften des bearbeiteten Flachmaterials erklären, was bei gleichen Strahlungsparametern zu unterschiedlichen Abtragsraten führt. Nicht erklären läßt sich damit der teilweise negative Anstieg bzw. Nullanstieg des Signalverlaufs.

Diese Erscheinung hat ihre Ursache im wesentlichen in der bereits erwähnten Entwicklung und Verdichtung entstehender Verbrennungsrisse und Verdampfungsgase an der unmittelbaren Bearbeitungsstelle. Diese absorbieren die Laserstrahlung mit ihrer Verdichtung zunehmend, so daß der Signalpegel nicht mit der Abtragstiefe korreliert. Die Überschreitung des Schwellwertes 2 erfolgt abrupt, häufig erst nach unerwünschtem Durchbruch des Materials an der Bearbeitungsstelle. Eine mehrfache Wiederholung der Bearbeitung führt trotz gleicher Verfahrensparameter und Randbedingungen zu unterschiedlichen Signalverläufen. Der Grund dafür wird in der zeitlichen und räumlichen Ungleichförmigkeit der Verbrennungsrisse und Verdampfungsgase im entstehenden Materialabtrag vermutet, was dadurch bestätigt wird, daß die Abweichungen der Detektorsignalverläufe von dem Detektorsignalverlauf 1.1 mit zunehmender Bearbeitungstiefe größer werden. Eine Abschaltung des Lasers (Abbruch des Signals 3) bei Überschreitung des Schwellwertes 2 durch den Signalpegel führt zu einer Sollbruchlinie stark schwankender Abtragstiefe.

Zur Erzeugung einer mit bloßem Auge nicht sichtbaren Sollbruchlinie konstanter Restwandstärke und damit konstanter und reproduzierbarer Bruchfestigkeit, ist dieses Verfahren aus den angeführten Gründen nicht geeignet.

Eine eventuelle Verfälschung der Transmissionswerte durch Absorption von Gasen und Verbrennungsrisseständen ist für den örtlich vollständigen Materialabtrag gemäß US 5,101,090 ohne Belang, da hier als Abschaltkriterium nicht eine bestimmte Intensität der Transmissionsstrahlung gilt, welche mit einer Restwandstärke korreliert, sondern die maximal erreichbare Intensität die bei vollständigem Materialabtrag erzielt wird.

Die Herstellung von Schwächelinien durch Erzeugung von aneinandergeriebenen Sacklöchern mittels Laser ist unter anderem aus EP 0234805 B1 und US 4,349,003 bekannt.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zu entwickeln, mit welchem mittels steuerbarer gepulster Laserstrahlung eine mit bloßem Auge nicht sichtbare Schwächelinie reproduzierbar und konstant herstellbar ist in einem Flachmaterial hergestellt werden kann.

Das Verfahren soll auch dann mit Erfolg anwendbar sein, wenn dieses Flachmaterial aus mehreren, auch inhomogenen Schichten besteht und in seiner Dicke nicht konstant ist.

Diese Aufgabe wird mit einem Verfahren zur Erzeugung einer Schwächelinie gemäß Anspruch 1 gelöst. Vorzuziehende Ausführungen sind in den Unteransprüchen angegeben.

Die Erfindung greift den aus dem Stand der Technik

bekannten Grundgedanken auf, den Abtrag bis auf eine bestimmte Flachmaterialstärke über die Erfassung einer durch dieses Flachmaterial transmittierten Strahlung zu steuern. Jedoch erst durch den erfindungsgemäßen Schritt der Integralverteilung über die detektierte Transmissionsstrahlung wird ein Wert gewonnen, welcher trotz ungleicher Beeinflussung der Transmissionsstrahlung durch Materialinhomogenitäten und Verdampfungsgasen gut mit der verbleibenden Restwandstärke korreliert. Dieses setzt jedoch voraus, daß die Schwächelinie keine Schnittlinie ist, sondern durch eine Anisotropisierung von Sacklöchern gebildet wird. Mit den Sacklöchern werden örtlich begrenzte Räume geschaffen, in denen die entstehenden Gase zumindest über den kurzen Zeitraum der Bearbeitung fest verbleiben. Die Beeinflussung der Strahlung durch die absorbierenden Gase ist dadurch bei der Herstellung der einzelnen Sacklöcher gleich. Darüber hinaus wird durch den lockeren Abtrag sicher gestellt, daß die detektierte Strahlung ausschließlich eine Transmissionsstrahlung durch den Boden des gerade bearbeiteten Sackloches ist. Gleiche Integralwerte lassen daher den Schluß auf wenigstens annähernd gleiche Restwandstärken zu.

Die Abschaltung der Laserstrahlung bei einer gewünschten Restwandstärke wird um so genauer, je besser das Signal-Rauschverhältnis und damit mehr Signale detektiert und zur Integralverteilung herangezogen werden. Durch die Steuerung des Lasers in Abhängigkeit von einem Integralwert, wodurch auch die Materialinhomogenitäten relativiert werden, werden sich das Verfahren als besonders vorteilhaft für die Bearbeitung inhomogener Materialien eignen.

Die Herstellung einer Schwächelinie durch Abtrag des Flachmaterials in Form von Sacklöchern hat bezüglich der beiden Forderungen, konstante Bruchfestigkeit und Nichtsichtbarkeit, weitere Vorteile:

- während bei der Schaffung einer Schwächelinie durch Einschnitten nur die Restwandstärke in der Schnittlinie als geometrische Größe zur Erlangung einer bestimmten Bruchfestigkeit variierbar ist, kann bei einer Anisotropisierung von Sacklöchern (im weiteren Perforationslinie genannt) auch die Siegbreite zwischen den Sacklöchern variiert werden;
- das Restmaterial muß beim Abtrag in Form einer Schnittlinie so stark sein, daß es sich nicht in die Schnittlinie einlagert und somit sichtbar wird. Dieses Einlagern wird bei der Perforationslinie auch bei weit geringeren Restwandstärken durch die als Stütze wirkenden Siegbreiten vermieden;
- eine über die gesamte Perforationslinie konstante Bruchfestigkeit läßt sich auch erzielen, wenn die Sacklöcher unterschiedliche Restwandstärken aufweisen, die sich periodisch wiederholen.

Insbesondere, wenn eine Schwächelinie in ein mehrschichtiges Verbundmaterial angebracht werden soll, erweisen sich in Abhängigkeit der Festigkeit der einzelnen Schichten verschiedene Schwächelinienstrukturen, d.h. verschiedene Folgen von Restwandstärken, als mehr oder weniger vorteilhaft. So kann in mehrschichtigen Materialien, bei denen die einzelnen Materialschichten eine hohe Festigkeit aufweisen, die Schwächelinie in einer Struktur erzeugt werden, bei der sämtliche Sacklöcher einer gleichen minimalen Restwandstärke auf-